

doi: 10.6046/zrzyyg.2021461

引用格式: 张田,周忠发,王玲玉,等. 基于无人机点云数据土壤粗糙度测量方法[J]. 自然资源遥感,2023,35(1):115-122.
(Zhang T,Zhou Z F,Wang L Y,et al. A method for soil roughness measurement based on UAV point cloud data[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(1):115-122.)

基于无人机点云数据土壤粗糙度测量方法

张 田^{1,2,3}, 周忠发^{1,2,3}, 王玲玉^{1,2,3}, 赵 馨^{1,2,3},
张文辉^{1,2,3}, 张 淑^{1,2,3}, 王 宇^{1,2,3}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院/喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要: 耕地土壤粗糙度是影响土壤水分、微波遥感观测和植物生长等农情信息监测方面的重要因子。土壤粗糙度通常是依据野外拍摄照片进行判读,但存在判读效率低、受人为因素影响等不足。无人机低空遥感对观测地表起伏状况具有良好的敏感性,因此基于摄影测量利用无人机对地表进行拍摄,将其结果与粗糙度测量板获取的数据进行对比,探讨无人机数据测量土壤粗糙度的精确性。研究结果表明:近景摄影测量的平均绝对误差主要集中在 0.4~1.2 cm 之间,平均相对误差为 6.16%,均方根误差为 0.40 cm。表明无人机点云摄影测量可有效运用于地表粗糙度的测量,且当分块采样的面积越小时,获得粗糙度的值越精确。

关键词: 土壤粗糙度; 点云数据; 近景摄影测量; 三维建模

中图法分类号: P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0115-08

0 引言

对土壤粗糙度的定义一般从 2 个角度进行描述:一个是从空气动力学概念出发,将地表风速为 0 的高度定义为土壤粗糙度^[1];另一个从地形学角度出发,将地表凹凸不平的程度定义为地表粗糙度,也称地形粗糙度^[2]。土壤粗糙度表征土壤表面的起伏程度,是影响雷达入射波和地面相互作用进而影响后向散射系数的参数,其测量结果的准确性直接影响土壤含水量反演精度^[3-5];在农情信息监测方面,对耕地土壤入渗参数、土壤孔隙率、地表径流与土壤侵蚀有重要影响^[6-8],快速、准确地测量地表粗糙度一直以来都是微波定量遥感和农情信息监测的重要内容。

目前,地表粗糙度的测量方法根据其特点可分为接触式和非接触式 2 种。常用的接触式测量主要有插板法、链条法和销钉高程测量^[9]等。接触式的

测量方法获取的是局部粗糙度特征,全域粗糙度特征的获取工作量较大,推广应用具有较大难度^[10]。常用的非接触式测量方式主要包括:超声波测量法^[11]、摄影测量法^[12]和激光扫描法^[13-14]等。超声波测量法容易造成反射,测量精度不高;激光扫描法主要是通过手持或三脚架固定扫描仪对目标地块进行扫描,其优点是测量精度高、效率高、无扰动^[15],但其所需的设备复杂、价格昂贵,且获取的数据存在明显的阴影效应^[16],在目标地块较大时,数据采集的工作量也随之增加;相比之下,摄影测量法的精度虽不及激光扫描法高,但其耗时短、所需设备简单、影像分辨率高^[17-18]等优点使其应用更具有推广性^[19]。

低空遥感技术是在无人机上搭载摄像头,通过无线电远程控制无人机在低空进行拍摄^[20-21]。通过无人机获取较高质量的、具有一定重叠度的密集点云,经过一定的预处理(拼接、降噪和重采样等)构建目标物体的三维模型。目前,点云数据的应用

收稿日期: 2021-12-27; 修订日期: 2022-05-18

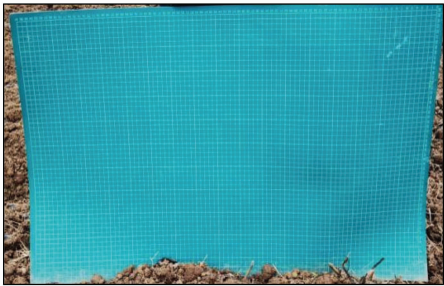
基金项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特石漠化地区生态资产与区域贫困耦合机制研究”(编号: 41661088)、贵州省高层次创新型人才培养计划项目“贵州省高层次创新型人才培养计划——‘百’层次人才”(编号: 黔科合平台人才[2016]5674)、贵州省科学技术基金资助项目“高原山区特色农作物超低空遥感特征构建与识别方法研究”(编号: 黔科合基础-ZK[2021]一般194)和国家自然科学基金面上项目“地块作物生长的光学与 SAR 遥感同步观测响应机制研究”(编号: 42071316)共同资助。

第一作者: 张 田(1997-),女,硕士研究生,研究方向为地理信息系统与遥感。Email: 20010090327@gznu.edu.cn。

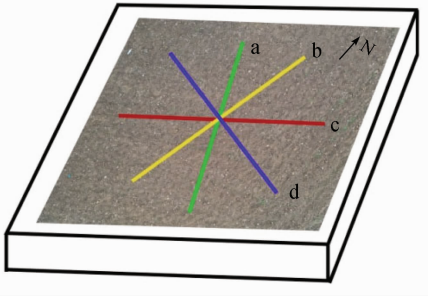
通信作者: 周忠发(1969-),男,教授,博士生导师,研究方向为喀斯特生态环境、GIS 与遥感。Email: fa6897@163.com。

主要集中在工程应用^[22]、林业调查^[23-24]以及城市三维建模^[25-26]等方面,现阶段将点云数据应用到土壤表面粗糙度测量的研究较少。

因此,本文结合激光扫描和摄影测量的优点,利用无人机获取研究区耕地的裸土点云,构建耕地表面三维模型,基于该三维模型模拟真实土壤表面,提取该模型表面所有点云的高程值,从而计算土壤粗糙度的各项参数。将此方法计算的土壤粗糙度参数和传统粗糙度测量板测得的结果进行对比和分析,讨论无人机点云数据对获取地表粗糙度的适用性和准确性。以期为耕地土壤粗糙度提供精准、无损、大范围、高效的测量新思路和方法,为微波定量遥感和农情信息监测等提供可靠的数据支撑。



(a) 测量板采样图



(b) 采样方向示意图

图 1 数据采集示意图
Fig.1 Data sampling diagram

个样方中进行一次测量板拍照。内业计算利用 Matlab 软件对该 20 张测量板照片进行裁剪、校正并分别提取土壤表面轮廓线。由于粗糙度的测量结果受测量方向的影响较大,因此测量板的数据采集在 a,b,c,d 这 4 个方向随机分布,如图 1(b)所示。

1.2 无人机点云摄影测量

实验使用的无人机为大疆-御 2 专业版,无人机的具体飞行参数如表 1 所示。

表 1 无人机、相机及飞行参数
Tab.1 UAV, camera and flight parameters

类别	参数	参数值
无人机参数	无人机质量/g	907(起飞重量)
	最大上升速度/(m/s)	5
	最大下降速度/(m/s)	3
相机参数	相机型号	L1D-20C_10.3
	焦距/mm	10
	相片 ISO 曝光范围	100~3 200(自动)
	相机分辨率/像素	5 472×3 648
飞行参数	飞行高度/m	10
	航向/旁向重叠度/%	75/75
	拍摄模式	悬停拍摄
	地面分辨率/cm	0.43
	照片数量/张	94

拍摄时间为 2020 年 12 月 9 日 11:00,在研究

1 数据源

研究区位于贵州省安顺市关岭布依族苗族自治县花江镇境内的一块裸土耕地,样区中心坐标为 25°49'43.37"N,105°35'34.44"E,该样区选在平坦、开阔的平地,且经过表层翻耕,避免了因地形及表面作物导致的测量误差,选取的样地面积为 20 m×16 m,将其划分为 20 个面积为 4 m×4 m 样方。

1.1 测量板实测数据

本文使用的测量板有水平和垂直 2 个方向的刻度线,间隔为 1 cm,如图 1(a)所示。将测量板垂直插入划分好的土壤样方中,拍摄角度与地面平行,每

区连续拍摄了 94 张正射影像,坐标系为 WGS-84 坐标,飞行高度为 10 m,对应影像的地面分辨率为 0.43 cm,航向和旁向重叠度均为 75%,保证了获取的每张影像之间均有足够的重叠度生成匹配点云。

2 研究方法

2.1 无人机影像处理

利用 Agisoft PhotoScan 摄影测量软件对无人机影像进行拼接处理,并基于内插法生成密集点云,共生成 20 986 847 个点,利用点云生成网络和纹理,最后构建三维实景模型。

三维重建的原理主要是实现点云的网格化处理^[27],其采用的算法是运动恢复结构(structure from motion,SFM)算法,SFM 算法直接将摄影测量与计算机视角算法相结合,对不同距离、不同视角的重叠影像自动提取影像特征并进行匹配^[28],该算法在影像的重叠部分自动检测影像特征点(即几何相似性),并检测这些特征点在多幅影像序列中的运动特征和相机参数,在保证影像的连续性和拍摄时间间隔较短的前提下,基于每张影像的位置、方向、焦距和特征点的运动规律就可以从多幅影像中的二维

坐标计算任意位置的三维坐标,从而校正影像并创建点云;另一方面,当相机参数未知时,可以从不同影像中获取等值点的二维坐标导出其在空间中的三维坐标^[29-32]。因此,在满足影像重叠率、地面分辨率和连续性的条件下,无需地面控制点,基于无人机在拍摄影像时写入的全球定位系统(global positioning system,GPS)方位和位置姿态系统(position and orientation system,POS)信息可生成高精度的密集点云。

基于每个样本中测量板的采样方向,对点云模型进行剖面采样,即在点云模型上截取和测量板方向相同的剖面,比较 2 种方法获取的土壤粗糙度差异。技术路线如图 2 所示。为避免采样长度和采样间隔对土壤粗糙度测量结果的影响,本文在样方内采取分块采样的方式提取土壤表面粗糙度,即将线采样模式上升为面采样模式,如图 3 所示。将 Agisoft PhotoScan 软件导出的三维表面模型导入三维点云编辑和处理软件 Cloud Comparer 中,在拍摄测量板的同一样方内进行点云数据的分块采样,将其剪裁为 20 个 1 m×1 m 的样块作为样本,再将裁剪后的点云数据输出为文本格式,将大地坐标系转换成影像坐标系,获取土粒之间相对位置与高程,从而得出土壤粒径的大小,计算粗糙度的各项参数。

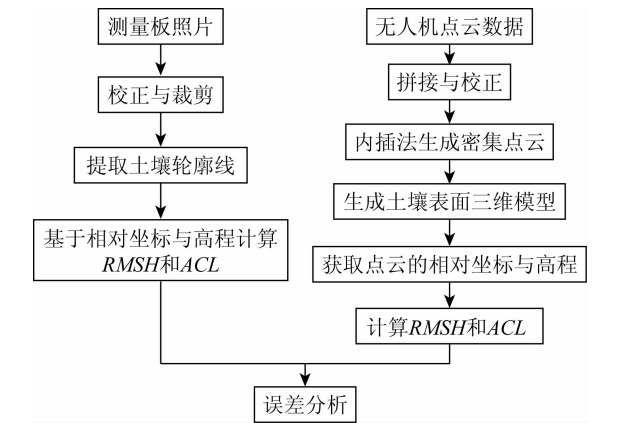


图 2 技术路线

Fig.2 Technical roadmap

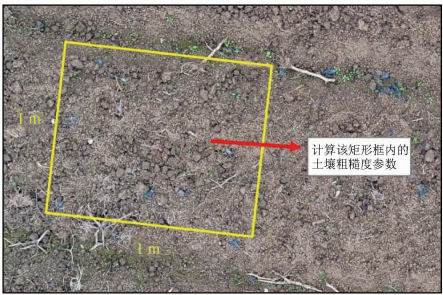


图 3 分块采样示意图

Fig.3 Schematic diagram of block sampling

2.2 土壤粗糙度计算

土壤表面起伏度的发生和演变是一个随机分布的过程,即其统计量不随空间尺度的变化而变化。因此,一般是利用其统计特性表征其土壤粗糙度^[33],包括均方根高度(root mean square height,RMSH)和自相关长度(autocorrelation length,ACL),二者分别在垂直和水平 2 个方向上对土壤粗糙度的大小进行描述^[34],RMSH 反映了土壤的平均高度偏离的程度,描述的是随机过程中在垂直方向上各个点之间相互独立的特征。而 ACL 描述了土壤的高度在水平方向上的变化,反映的是地表高度在水平方向上的关联性。

2.2.1 RMSH

一般当地表的粗糙度越大时,RMSH 值就越大^[35]。假设平面内一点(x,y)的高度为 Z ,选取具有代表性的一部分区域,假设区域的中心位置为原点,再分别取平行和垂直于地表的一段距离,则对于平面内一点的 RMSH 定义为:

$$RMSH = \left\{ \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N (Z_i)^2 - N(\bar{Z})^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

式中: N 为测量板上 x 方向的刻度数(在点云模型中表示点云数量); i 为高度数据中的序列号; Z_i 为粗糙度测量板上第 i 个刻度上的高度数据(在点云模型中表示各点云的高程值); $\bar{Z}$ 为各点高度数据的平均值。

2.2.2 ACL

ACL 是估计地表 2 点之间相互独立的标准^[36]。ACL 是根据测量板上 x 轴方向上 2 点之间的间隔来定义,一般是通过利用一组数据的归一化自相关函数 $\rho(x)$ 计算 ACL 值。通常,如果 2 点间的距离大于 ACL 值,则认为这 2 点的高度值在统计学意义上是相互独立的。对于离散型数据而言,公式可表示为:

$$\rho(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} Z_i Z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N Z_i^2}, \quad (2)$$

式中 j 为一个大于 1 的自然数,当 $\rho(x) = 1/e$ 时的间隔,两者之间的距离 x 则被称为 ACL。

2.2.3 精度验证

为定量描述无人机近景摄影测量方法的精度,以测量板的计算结果为基准值,衡量无人机点云摄影测量在剖面上的测量精度,选取绝对误差(absolute error,AE)、相对误差(relative error,RE)和均方根误差(root mean square error,RMSE)表示测量结果的误差,三者的值越小表明测量的精度越高^[37]。其表达式分别为:

$$AE = P_i - O_i, \quad (3)$$

$$RE = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\% \quad , \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad , \quad (5)$$

式中： P_i 为第 i 个测量值； O_i 为第 i 个基准值； n 为样本数。

3 结果与分析

3.1 测量结果分析

3.1.1 测量板法与点云剖面测量结果分析

由采集得到的测量板数据的计算结果表明，研究区土壤地表具有较好的空间连续性，其 $RM\text{-}SH$ 和 ACL 的变异系数分别为 56% 和 18%，这表明样区空间异质性较强。一般情况下，光滑土壤表面的 $RMSH < 0.6\text{ cm}$ ，粗糙土壤表面的 $RMSH \geq 0.6\text{ cm}$ ^[38-39]。如图 4 所示，该方法测量出的实验样区的 $RMSH$ 值大多在 0.8 ~ 1.4 cm 之间，表明该区域的土壤粗糙度较大，即土壤表面较粗糙。 ACL 值主要集中 30 ~ 55 cm 之间，表明单个样本中各高度点之间的相互独立性较大。基于测量板的测量方向在点云摄影测量上截取剖面并计算剖面上土壤粗糙度的 $RMSH$ 和 ACL ，通过对比 2 种方法的计算结果发现， $RMSH$ 和 ACL 的总体变化趋势一致，表明将无人机点云数据运用于地表粗糙度的测量具有可行性。

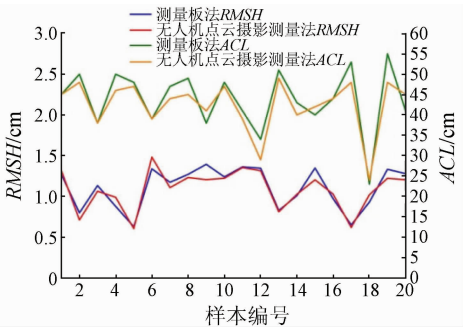


图 4 测量板法与近景摄影测量法结果对比
Fig. 4 Result comparison between measuring boards method and close - range photogrammetry

3.1.2 精度验证

以测量板法的结果为基准，对基于无人机点云面状样本为基础截取的线状剖面上的土壤粗糙度参数进行精度验证，摄影测量法的平均 AE 值为 0.68 cm，其范围主要集中在 0.4 ~ 1.2 cm 之间，平均 RE 值为 6.16%，RMSE 值为 0.40 cm；整体误差较小；二者的结果对比如表 2 所示。利用测量板法和近景摄影测量法对同一地块的土壤粗糙度进行测量，结果发现摄影测量法的测量结果比测量板法小。

表 2 表面粗糙度参数测量结果对比

Tab. 2 Comparison of accuracy verification of surface roughness parameter measurement results (cm)

	测量板法		无人机点云摄影测量法	
	<i>RMSH</i>	<i>ACL</i>	<i>RMSH</i>	<i>ACL</i>
平均值	1.08	44.04	1.09	42.40
方差	0.06	53.00	0.05	41.41
最大值	1.39	55.00	1.48	49.00
最小值	0.80	23.00	0.60	24.00

将无人机点云摄影测量和测量板所得到的同一样方上土壤表面的轮廓线进行对比，如图 5 所示，测量板和无人机点云的三维建模方法所取得的二维样线趋势一致，说明无人机点云数据可有效应用于土壤表面粗糙度测量，但二者在 mm 尺度上仍具有一定的差异，其原因主要在于测量板主观因素较大、无人机在飞行过程中受外界以及机身的抖动等影响造成。2 种方法获得的土壤表面轮廓线在水平方向上起伏较大，这也是造成其 ACL 值较大的原因。

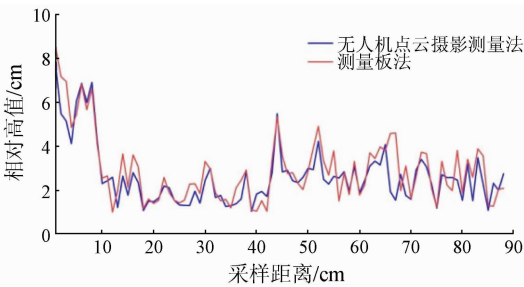


图 5 不同测量方法所取得的同一土壤样线比较
Fig. 5 Comparison of the same soil transect obtained by different measurement methods

3.2 无人机面状点云摄影测量结果分析

一般情况下，采样数目和采样间隔对土壤粗糙度测量结果的影响较大。且采样长度越长，获得的粗糙度的值越精确，但另一方面，内业的工作量将成倍增加，且采样长度和间隔的影响仍然不可避免。面状采样模式可有效地避免这一误差，且可以提取土壤表面更微观的粗糙度信息。由图 6 可以看出， $RMSH$ 值分别集中在 0.02 ~ 0.03 cm 之间，总体变

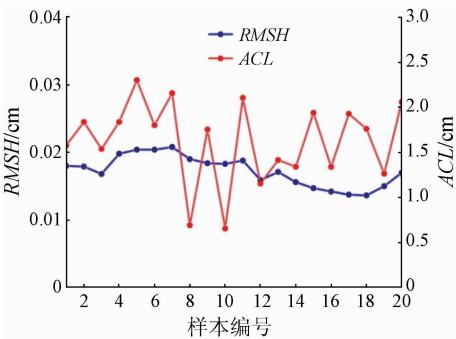


图 6 无人机摄影测量计算结果
Fig. 6 UAV photogrammetry calculation results

化较为稳定,变化幅度减小; ACL 值主要集中在 1.0 ~2.0 cm 之间,RMSH 和 ACL 与截取剖面的计算结果相差较大,原因主要为摄影测量中 i 为样本中点云的数量,而非测量板上刻度的序列号,二者相差较大,造成整体的变化幅度较大。

为更直观地描述出在不同取样面积下土壤粗糙度的变化程度,在同一个样方上分别裁剪了面积为 100 cm × 100 cm,80 cm × 80 cm,60 cm × 60 cm,40 cm × 40 cm,20 cm × 20 cm,10 cm × 10 cm 的 6 块样本点。其测量结果如表 3 所示,当采样的面积逐渐减小时,RMSH 值也在减小,对土壤粗糙度描述的精细度越高。ACL 的比值随着采样面积的减小而出现较大波动,说明采样面积的大小对测量的结果影响较大。由图 7 中看出,采样面积减小时,土壤表

面的起伏程度表现的更为详细,说明本文的技术手段可以获取微地貌的精准尺度信息,而所用的硬件属于常规的无人机搭载普通摄像头,所用的软件也是常见的图像处理软件,具有可推广性。

表 3 不同采样面积下的土壤粗糙度参数测量结果

Tab.3 Measurement results of soil roughness parameters under different sampling area

采样面积/ (cm × cm)	RMSH/cm	ACL/cm	与上位测量结果之差	
			RMSH/cm	ACL/cm
100 × 100	0.16	1.44	—	—
80 × 80	0.13	1.00	0.03	0.44
60 × 60	0.11	0.53	0.02	0.47
40 × 40	0.07	0.89	0.04	-0.36
20 × 20	0.04	0.26	0.03	0.63
10 × 10	0.02	0.14	0.02	0.12

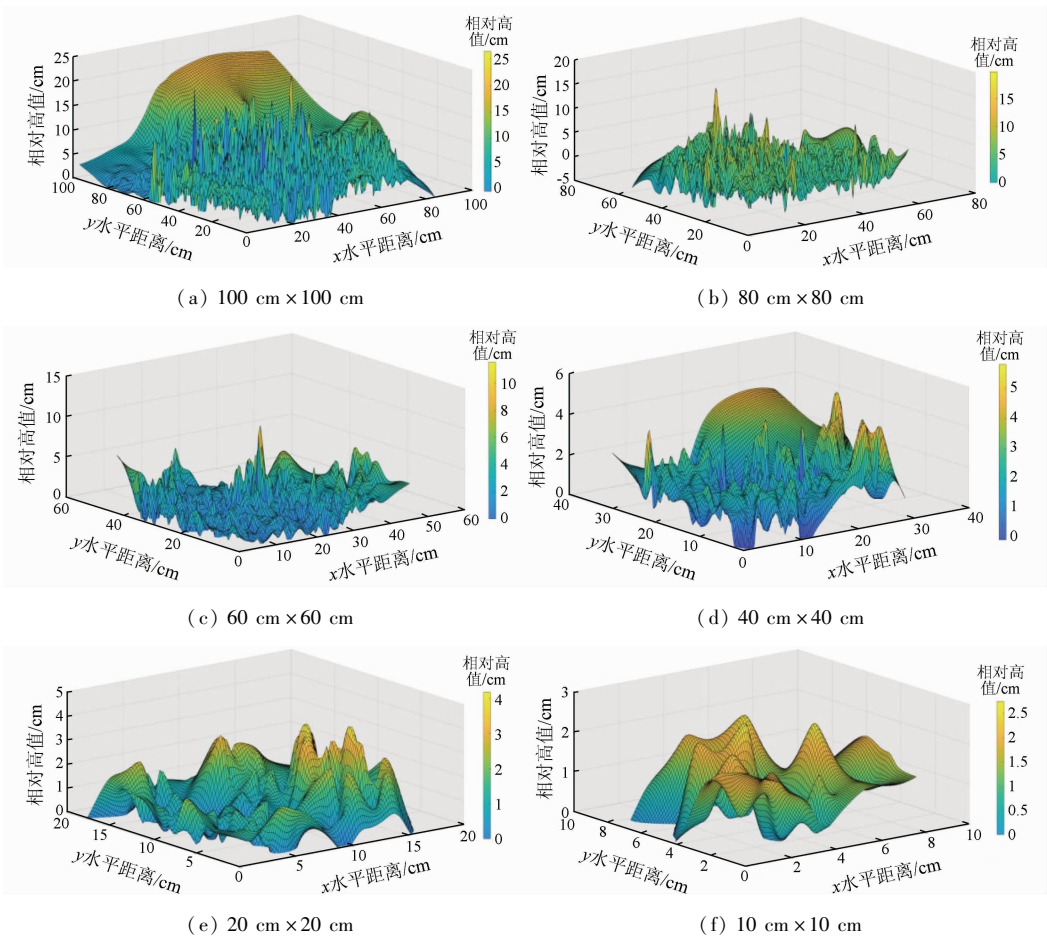


图 7 不同采样面积的土壤表面模型

Fig.7 Soil surface models of different sampling area

3.3 综合评价

测量板法成本与技术难度低、操作性强,但会对土壤表面造成一定的破坏;基于无人机影像获取的点云数据测量地表土壤粗糙度,该方法为非接触的测量方式,不会对地表的原始形态造成破坏。除此之外,在密集点云的基础上采取了面状采样的方法进行测量,避免了因测量板的长度有限、采样间隔和

采样方向(方向异质性)的不同引起的误差,提高了测量的精度。

2 种方法外业数据采集和内业计算单个样本所需的具体时间如表 4 所示。本文采取的方法影像的后期处理所需的时间较长,尤其在拼接、建模的环节中,由于影像精度较高,数据量较大,计算机处理时间较长。分块采样的方式也使得工作量成倍增加,

因而在今后的研究工作中,需要进一步的改进和优化。

表 4 2 种方法所需时间及精度对比

Tab.4 Comparison of the required time and accuracy of the two methods

方法	外业数据 采集/s	内业处理 与计算/min	所需 设备	RMSE/ cm	测量 维度
测量板法	60	10	测量板	1.08	2D
无人机点云 摄影测量法	2	20	无人机	0.32	3D

4 结论和讨论

近景摄影测量法利用无人机搭载摄像头获取待测区域的地表影像,生成密集点云数据后构建三维模型,在分块采样的基础上进行测量。与传统测量板法相比,具有如下优点:

1)稳定性及效率较高。由实验结果可知,近景摄影测量的平均绝对误差主要集中在 0.4~1.2 cm 之间,平均相对误差为 6.16%,均方根误差为 0.40 cm;近景摄影测量面状采样的方法避免了采样长度限制、采样间隔的不同与方向异质性而造成的误差问题,且当分块采样的面积越小时,测量结果越准确。

2)使用非接触地表的测量方式。非接触式的近景摄影测量法避免了在野外测量过程中测量板对地表微结构的破坏,在地表最真实的表面进行测量,降低了测量的误差。

3)在内业计算中可替代大量野外数据采集。在获取了密集点云数据后,可根据需要自由地调节分块采样的面积和数量,有效减少野外工作的时间和成本。

4)综合测量精度、时间和效率等评价指标,基于无人机影像生成点云数据的近景摄影测量方法更高效,更适用于地表土壤粗糙度的测量,且可根据目标单位面积或影像像元大小测量相应面积的土壤粗糙度。

参考文献 (References):

[1] 徐元柳. 基于裸露地表辐射传输模型的粗糙度反演与地形校正[D]. 北京:中国地质大学(北京),2009:45-53.
Xu Y L. Roughness retrieval and topographic correction based on bare surface radiative transfer model[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2009:45-53.

[2] 江冲亚,方红亮,魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展,2012,27(3):292-303.
Jiang C Y,Fang H L,Wei S S. Review of land surface roughness parameterization study[J]. Advances in Earth Science,2012,27(3):292-303.

[3] 姜灵海. 基于哨兵数据的土壤水分反演算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
Jiang L H. Research on soil moisture retrieval based on Sentinel data[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2020.

[4] 梁勇,杨磊,吴秋兰,等. 地表粗糙度影响下的 GNSS-R 土壤湿度反演仿真分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(10):1546-1552.
Liang Y,Yang L,Wu Q L,et al. Simulation of soil roughness impact in GNSS-R soil moisture retrieval[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2018,43(10):1546-1552.

[5] Alvarez-Mozos J,Verhoest N E,Larranaga A,et al. Influence of surface roughness spatial variability and temporal dynamics on the retrieval of soil moisture from SAR observations[J]. Sensors (Basel),2009,9(1):463-489.

[6] 陈世超,林剑辉,孙宇瑞,等. 基于土壤表面粗糙度预测降雨影响下的表层土壤孔隙度[J]. 北京林业大学学报,2013,35(2):69-74.
Chen S C,Lin J H,Sun Y R,et al. Predicting topsoil porosity using soil surface roughness under rainfall influence[J]. Journal of Beijing Forestry University,2013,35(2):69-74.

[7] Darboux F,Gascuelodoux C,Davy P. Effects of surface water storage by soil roughness on overland-flow generation[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2010,27(3):223-233.

[8] García Moreno R,Díaz Álvarez M C,Saa Requejo A,et al. Multi-fractal analysis of soil surface roughness[J]. Vadose Zone Journal,2008,7(2):512-520.

[9] Thomsen L M,Baartman J E M,Barneveld R J,et al. Soil surface roughness:Comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model[J]. Soil,2015,1(1):399-400.

[10] Riegler-Nurscher P,Moitzi G,Prankl J,et al. Machine vision for soil roughness measurement and control of tillage machines during seedbed preparation[J]. Soil and Tillage Research,2020,196:104351.

[11] Robichaud P R,Molnau M. Measuring soil roughness changes with an ultrasonic profiler[J]. Transactions of the ASAE,1990,33(6):1851-1858.

[12] 陶浩然,陈权,李震,等. 近景摄影测量提高裸露地表粗糙度测量精度[J]. 农业工程学报,2017,33(15):162-167.
Tao H R,Chen Q,Li Z,et al. Improvement of soil surface roughness measurement accuracy by close-range photogrammetry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(15):162-167.

[13] 蔡祥,孙宇瑞,林剑辉,等. 基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(1):68-69.
Cai X,Sun Y R,Lin J H,et al. Design of a laser scanner for characterizing soil surface roughness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1):68-69.

[14] 王章琼,白俊龙,张明. 数码摄影测量及三维建模在岩体结构面粗糙度教学中的应用[J]. 实验技术与管理,2020,37(3):45-47.
Wang Z Q,Bai J L,Zhang M. Application of digital photogrammetry and 3D modeling in teaching of rock discontinuity surface roughness[J]. Experimental Technology and Management,2020,37

(3):45-47.

[15] 王洪晓,张光辉,朱平宗,等. 3 种地表随机糙率测量方法比较[J]. 水土保持研究,2020,27(4):72-76.

Wang H X,Zhang G H,Zhu P Z,et al. Comparison of three methods to measure surface random roughness[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2020,27(4):72-76.

[16] 张胜宾,黄培奎,赵祚喜. 土壤表面粗糙度检测方法研究[J]. 农机化研究,2016,38(11):257-262.

Zhang S B,Huang P K,Zhao Z X. A research on soil surface roughness measurement methods[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(11):257-262.

[17] 李红阳. 基于无人机摄影测量技术的土地调查方法研究[D]. 唐山:华北理工大学,2018.

Li H Y. The research method of land survey based on UAV photogrammetry techology[D]. Tangshan:North China University of Science and Technology,2018.

[18] 李德仁,李 明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):505-512.

Li D R,Li M. Research progress and application prospect of UAV remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2014,39(5):505-512.

[19] Warner W S. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photography[J]. Soil and Tillage Research,1995,34(3):187-197.

[20] 许元红. 低空无人机技术在贵州山区大比例尺 DLG 制作中的应用研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2018:1-8.

Xu Y H. The application of low-altitude drone thchnology in the production of large scale DLG in Guizhou mountain area[D]. Guiyang:Guizhou Normal University,2018:1-8.

[21] 胡玉祥,张洪德,熊文辉,等. 基于三维激光点云的地表竣工规划验收测绘级工程应用[J]. 测绘通报,2020(s1):53-58.

Hu Y X,Zhang H D,Xiong W H,et al. Survey and engineering application of metro completion plan acceptance based on 3D laser point cloud[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2020(s1):53-58.

[22] 尹林江,周忠发,李韶慧,等. 基于无人机可见光影像对喀斯特地区植被信息提取与覆盖度研究[J]. 草地学报,2020,28(6):1664-1672.

Yin L J,Zhou Z F,Li S H,et al. Research on vegetation extraction and fractional vegetation cover of Karst area based on visible light image of UAV[J]. Acta Agrestia Sinica,2020,28(6):1664-1672.

[23] 冯静静. 基于 LiDAR 点云数据与高分辨率影像的单木参数提取[D]. 北京:北京林业大学,2017:1-5.

Feng J J. Single tree parameter extraction based on LiDAR point cloud data and high resolution image[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2017:1-5.

[24] 赵 勋,岳彩荣,李春干,等. 基于机载 LiDAR 点云数据森林郁闭度估测[J]. 遥感技术与应用,2020,35(5):1136-1145.

Zhao X,Yue C R,Li C G,et al. Canopy density estimation based on airborne LiDAR point cloud data[J]. Remote Sensing Technology and Application,2020,35(5):1136-1145.

[25] 姜 云,王 军,陈方圆. 黑土区大田尺度下 LiDAR 点云数据农作物种植区提取[J]. 测绘工程,2020,29(4):32-37.

Jiang Y,Wang J,Chen F Y. Extraction of paddy planting area based on LiDAR point cloud data at field-scale in black soil area[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2020,29(4):32-37.

[26] 段 平,李 佳,李海坤,等. 无人机影像点云与地面激光点云匹配的三维建模方法[J]. 测绘工程,2020,29(4):44-47.

Duan P,Li J,Li H K,et al. 3D modeling method of UAV image point cloud matching with ground laser point cloud[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2020,29(4):44-47.

[27] 刘 洁,杨晓菊,廖宜涛,等. 基于线结构激光传感器的土壤表面粗糙度测量方法研究[J]. 农业工程学报,2019,35(3):134-138.

Liu J,Yang X J,Liao Y T,et al. Study on soil surface roughness measurement method based on linear laser sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(3):134-138.

[28] 罗 达,林杭生,金 钊,等. 无人机数字摄影测量与激光雷达在地形地貌与地表覆盖研究中的应用及比较[J]. 地球环境学报,2018,10(3):215-222.

Luo D,Lin H S,Jin Z,et al. Application and comparison of UAV digital photogrammetry and LiDAR in topography and land cover research[J]. Journal of Earth Environment,2018,10(3):215-222.

[29] Verhoeven G. Taking computer vision aloft-archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan[J]. Archaeological Prospection,2011,18(1):67-73.

[30] Remondino F,El-Hakim S. Image-based 3D modelling: A review[J]. Photogrammetric Record,2010,21(115):269-291.

[31] Tavani S,Granado P,Corradetti A,et al. Building a virtual outcrop,extracting geological information from it,and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran)[J]. Computers and Geosciences,2014,63:44-53.

[32] 柴子为,康 峻,王 力,等. 基于无人机影像的山地人工林景观 DEM 构建[J]. 遥感技术与应用,2015,30(3):504-509.

Cai Z W,Kang J,Wang L,et al. Construction of mountain plantation landscape DEM based on UAV image[J]. Remote Sensing Technology and Application,2015,30(3):504-509.

[33] 行敏锋,黄 方,官雨薇. 基于图像处理的土壤表面粗糙度测量实验研究[J]. 实验科学与技术,2019,17(6):1-3.

Xing M F,Huang F,Guan Y W. Experimental study on measurement of soil surface roughness based on image processing[J]. Experiment Science and Technology,2019,17(6):1-3.

[34] 刘立超,魏国梁,张青松,等. 基于激光雷达的农业耕作微地貌测量装置设计与实验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):85-91.

Liu L C,Wei G L,Zhang Q S,et al. Design and experiment of agricultural microgeomorphology measuring device based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):85-91.

[35] 雷志斌. 基于高分三号雷达数据的作物覆盖区土壤水分反演研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020:18-20.

Lei Z B. Research on soil moisture retrieval of crop covering area based on GaoFen3 Radar data[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2020:18-20.

[36] 李 俐,王 荻,潘彩霞,等. 基于神经网络与决策树的土壤粗糙

度测量[J]. 农业工程学报,2015,31(14):132–138.

Li L, Wang D, Pan C X, et al. Soil surface roughness measuring method based on neural network and decision tree[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14):132–138.

[37] 张恒瑞,段喜明,魏 征,等. 基于无人机多光谱遥感的华北地区夏玉米 LAI 监测[J]. 山西农业科学, 2021, 49(5):608–614.

Zhang H R, Duan X M, Wei Z, et al. LAI monitoring of summer maize in North China based on UAV multi-spectral remote sensing[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(5):608–614.

[38] 郑兴明,赵 凯,李晓洁. 农田表面粗糙度参数的测量与精度分析[J]. 地球信息科学学报,2013,15(5):753–755.

Zheng X M, Zhao K, Li X J. Accuracy analysis of agriculture soil surface roughness parameter[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(5):753–755.

[39] Kim S B, Moghaddam M, Tsang L, et al. Models of L-band Radar backscattering coefficients over global rain for soil moisture retrieval[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2):1381–1396.

A method for soil roughness measurement based on UAV point cloud data

ZHANG Tian^{1,2,3}, ZHOU Zhongfa^{1,2,3}, WANG Lingyu^{1,2,3}, ZHAO Xin^{1,2,3},
ZHANG Wenhui^{1,2,3}, ZHANG Shu^{1,2,3}, WANG Yu^{1,2,3}

(1. School of Geography and Environmental Science, Institute of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China; 3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: The soil roughness of cultivated land is an important element affecting the monitoring of agricultural information, such as soil moisture, microwave remote sensing observation, and plant growth. Soil roughness is generally interpreted according to field photos. However, such interpretation suffers some shortcomings such as low efficiency and anthropogenic effects on processing results. UAV low-altitude remote sensing is sensitive to surface relief. To explore the precision of the soil roughness determined using UAV data, this study employed UAV photogrammetry to photograph the surface and then compared the photogrammetry results with the data obtained using a gauging plate for soil roughness. The results show that the close-range photogrammetry had mean absolute errors of mainly 0.4~1.2 cm, a mean relative error of 6.16%, and a root mean square error of 0.40 cm. Therefore, UAV-based point cloud photogrammetry could be effectively applied to the measurement of surface roughness, and a smaller sampling area is associated with more accurate soil roughness.

Keywords: soil roughness; point cloud data; close-range photogrammetry; three-dimensional modeling
(责任编辑: 陈 理)